



Universitat  
Autònoma  
de Barcelona



# MODELO DE UN GRUPO DE ROBOTS COLABORADORES CAZADORES

Memòria del Projecte Fi de Carrera  
d'Enginyeria en Informàtica

realitzat per

**Jorge García Colmenar**

i dirigit per

**Lluís Ribas Xirgo**

Bellaterra, 15 de Junio de 2007





El sotasignat, Lluís Ribas i Xirgo,  
professor/a de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la UAB,

**CERTIFICA:**

QUE el treball a què correspon aquesta memòria ha estat realitzat sota  
la seva direcció per en Jorge García Colmenar

I per tal que consti firma la present.

Signat: .....

Bellaterra, 15 de juny de 2007



# Tabla de Contenidos

---

## **CAPÍTULO 1: Introducción**

### **1.1.- Resumen**

### **1.2.- Motivaciones**

1.2.1.- Un vistazo general a los sistemas multiagente

1.2.2.- Microrrobots en aplicaciones biomédicas

### **1.3.- Objetivos**

### **1.4.- Organización de la Memoria**

## **CAPÍTULO 2: Descripción del Proyecto**

### **2.1.- Fundamentos Teóricos**

### **2.2.- Planificación seguida**

### **2.3.- Fases del Proyecto**

## **CAPÍTULO 3: Diseño e Implementación**

### **3.1.- El Algoritmo Deliberativo**

3.1.1.- Estado de Búsqueda

3.1.2.- Estado de Ayuda

3.1.3.- Estado de Aproximación y Parada

3.1.4.- Estado de Aproximación y Captura

### **3.2.- Adaptación de los Minirobots empleados**

3.2.1.- Especificaciones técnicas

3.2.2.- Componentes empleados

3.2.3.- Montaje del Robot

## **CAPÍTULO 4: Resultados y Conclusiones**

### **4.1.- Objetivos Conseguidos**

### **4.2.- Posibles ampliaciones del Problema**

### **4.3.- Agradecimientos y valoración personal**

**ANEXO A: Esquemas de circuitos utilizados.**

**ANEXO B: Glosario y Definiciones.**

**ANEXO C: Referencias bibliográficas.**

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

### 1.1.- Resumen del Proyecto

El número de aplicaciones de los microrobots en biomedicina crece a medida que el desarrollo de éstos avanza. Entre ellas se encuentran las consistentes en examinar células con microrobots cooperantes. En este trabajo se presenta un prototipo a escala de este problema, debidamente simplificado: dos robots tratan de atrapar una pelota que representa a la célula que se examina.

Como resultado, se ha obtenido un Algoritmo Deliberativo para la resolución de este problema con robots homogéneos.

## 1.2.- Motivaciones

Los sistemas de microrobots autónomos cooperantes son de interés en todas aquellas aplicaciones en las que no sea posible (por distancia o por tamaño) el trabajo de máquinas con *control directo*<sup>1</sup>. Esto sucede, por ejemplo, en aplicaciones biomédicas en las que se opera con células.

Así pues, es necesario que los microrobots tengan un alto grado de autonomía, aunque acepten órdenes externas de carácter más abstracto. Ha de ser posible, por ejemplo, detener el trabajo de todos los robots o indicarles cuándo deben empezar. Por otra parte, la obligada simplicidad de los microrobots hace necesario que cooperen entre sí para poder llevar a cabo tareas más complejas.

Este trabajo tiene por finalidad crear un modelo a escala de un sistema de microrobots para aplicaciones biomédicas empleando minirobots disponibles comercialmente.

Esta plataforma a escala permitirá probar métodos de diseño de sistemas multirobot y aplicarlos, más tarde, a los microrobots y microactuadores de entornos reales.

Dado que en el modelo a escala no será posible utilizar el mismo tipo de sensores y actuadores ni tampoco un entorno similar al de los microrobots, se ha buscado un “problema juguete” que permita cumplir con los objetivos del trabajo y, a la vez, tenga suficientes analogías con los problemas derivados de las aplicaciones reales.

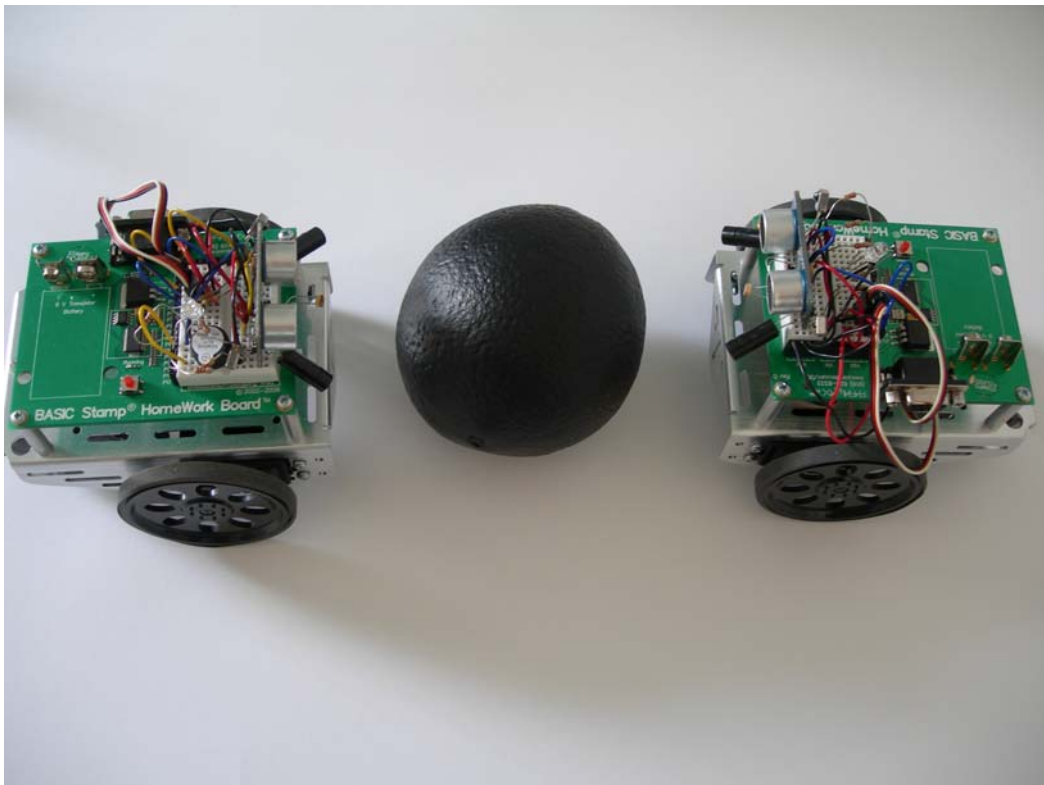
---

<sup>1</sup> Se entiende por *control directo* aquel en el que todas las acciones que realiza una determinada máquina son indicadas de manera externa a la misma.



Con ello, se obtendrá, al menos, un modelo de comportamiento de los robots, que se espera sea trasladable fácilmente a los microrobots.

El problema a resolver para los minirobots del modelo a escala es el de atrapar a una pelota (véase la fig. 1) que se encuentra en su campo de operaciones. Así pues, el trabajo que se ha realizado ha consistido, fundamentalmente, en el diseño de unos robots que cooperan para conseguir inmovilizar una pelota.



- Figura 1 -

En este sentido, cabe indicar que la analogía entre el problema juguete y uno real, estriba en algunas de las limitaciones que se imponen en cuanto a la capacidad computacional de los robots y en la necesidad de que éstos, en una primera fase, se sitúen alrededor de la muestra que se examina. En las aplicaciones reales, además, los microrobots deberían moverse

alrededor de las células que examinan o realizar algún tipo de operación auxiliar que los del modelo a escala no harán.

### 1.2.1.- Un vistazo general a los sistemas multiagente

Definifimos *Sistema Multiagente* como una colección de agentes que coexisten en un entorno, interactúan los unos con los otros, y tratan de optimizar una labor. Los agentes pueden interactuar implícita o explícitamente.

La **comunicación implícita** se produce cuando los agentes no interactúan de forma directa entre ellos, sino produciendo cambios en el entorno. Por ejemplo, existe cierto tipo de hormigas llamadas *Camponotus* que construyen hormigueros en forma de torres. Cada hormiga toma un grano de arena y lo coloca encima del montón de arena más alto que encuentra. Esto produce cambios en el entorno, pero no existe una comunicación directa entre hormigas.

La **interactuación explícita**, sin embargo, presupone algún tipo de comunicación mediante símbolos o señales.

Rigiéndonos por el tipo de control, los sistemas multiagente pueden ser centralizados o descentralizados.

En el **control centralizado** varios agentes dependen de una unidad central, que es la encargada de tomar las decisiones. La unidad central recibe toda la información que le envían los demás agentes. La principal ventaja de este sistema, es que como la unidad central almacena mucha información, es más eficiente a la hora de obtener soluciones. Como desventajas, indicar que la unidad central estará recibiendo continuamente datos de los otros agentes, pudiéndose provocarse una congestión al recibir gran cantidad de datos, y ralentizarse la toma de decisiones. Además, si la

unidad central falla o deja de funcionar, deja de funcionar todo el sistema, pues los demás agentes pierden la capacidad de decidir.

En el **control descentralizado** cada agente decide qué hacer por su cuenta, sin recibir órdenes de ninguna otra entidad. Con éste tipo de control el sistema es mucho más dinámico y rápido, pues no es necesario ni el envío ni el almacenamiento de información. Además, si deja de funcionar un agente, todos los demás pueden seguir funcionando independientemente. Es difícil diseñar los algoritmos de programación, porque aunque son muy simples, deben de funcionar correctamente, es decir, es difícil encontrar un algoritmo sencillo que funcione, pero una vez encontrado, es muy fácil de aplicar e implementar.

Ejemplos de ambos tipos de controles podemos encontrarlos en los equipos participantes en la RoboCup, un campeonato de fútbol entre robots que se celebra todos los años [1].



La **inteligencia en los sistemas multiagente** ha sido descrita como Inteligencia Colectiva. Se trata de la inteligencia que emerge de la colaboración y/o competición de muchos individuos que, actuando conjuntamente, simulan una única mente.

La Inteligencia Colectiva aparece en una vasta variedad de formas dentro de la Toma de Decisiones Consensuada por parte de bacterias, animales, humanos y computadores. El estudio de la Inteligencia Colectiva propiamente dicho debería considerarse un subcampo de la **Sociología**.

La Mente de Enjambre (Swarm Intelligence) [2] es la Técnica de Inteligencia Artificial basada en el estudio del comportamiento colectivo en sistemas autónomos y descentralizados.

Atendiendo al tipo de agente, encontramos los **Agentes Intencionales**, que se distinguen por ser capaces de razonar sobre sus creencias e intenciones. Se pueden considerar como sistemas de planificación que incluyen creencias e intenciones en sus planes.

Dentro de éstos, se sitúan los **Agentes Sociales**, que se pueden definir como agentes intencionales que mantienen, además, un modelo explícito de otros agentes y son capaces de razonar sobre estos modelos

El problema actual queda definido como sigue: *Sistema Multiagente Deliverativo Descentralizado de entorno estático*.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> *Entorno Estático*: Consiste en una serie de elementos inalterables entre los cuales un Agente navega, los manipula o simplemente resuelve un problema.

### 1.2.2.- Microrobots en aplicaciones biomédicas

Los microrobots son robots de reducidas dimensiones, entorno al  $\text{cm}^3$ , capaces de realizar tareas relativamente complejas y de manipulación con precisiones de micrómetros.

En el mundo macroscópico, las operaciones cooperativas están bien establecidas en la industria y sus ventajas son bien evidentes. Sin embargo, en el mundo microscópico las experiencias de robots cooperativos se encuentran en sus primeras etapas de desarrollo. Cabe destacar el trabajo que se está realizando con el microrobot Nano-Walker [3] o el que se ha realizado dentro del proyecto MICRON [4].

El **Nano-Walker** es el primer microrobot totalmente autónomo que realiza tareas complejas a escala molecular e incluso a nivel atómico. Este proyecto es un claro ejemplo de microrobots en entornos cooperativos, aunque actualmente sólo realicen pequeñas tareas de cooperación.

Al igual que el proyecto Nano-Walker, el objetivo del proyecto **MICRON** es el desarrollo de microrobots capaces de realizar tareas complejas a escala molecular y manipular objetos del orden de micrómetros. Similarmente, también tiene como objetivo que los robots realicen diferentes tareas de forma cooperativa.

Para conseguir que puedan manipular objetos con precisión de micrómetros, los microrobots están dotados de diferentes microherramientas: pinza, pipeta, punta de microscopia de fuerzas atómicas (AFM).

Éstos robots también tienen completa autonomía disponiendo de batería propia e incluso utilizan sistemas de emisión de energía externos para dar mayor tiempo de autonomía al microrobot.

La cooperación entre ellos se derivará del algoritmo que materialice el controlador que les gobierne. Éste tendrá que ser implementado atendiendo a las limitaciones que imponen el tamaño y la limitada capacidad energética de estos robots.

Hay otros trabajos interesantes con microrobots cooperativos, como las **Minifábricas** [5]. En este proyecto, varios robots móviles trabajan de forma cooperativa, pero no lo hacen a nivel molecular, las dimensiones de trabajo están uno o dos órdenes de magnitud por encima de las dimensiones de trabajo de los microrobots comentados anteriormente (Nano-Walker y MICRON).

Existe también un proyecto similar, **Olympus** [6], en el que se propone una microfábrica para endoscopia. Básicamente este sistema es una miniaturización de las líneas de producciones convencionales. Las operaciones son principalmente tele-operadas y no hay un verdadero trabajo cooperativo entre las máquinas. Con todo, con las diferentes herramientas de que disponen los microrobots es posible desarrollar experimentos biomédicos que hasta ahora no eran alcanzables tecnológicamente. Por ejemplo, se pueden caracterizar las propiedades mecánicas de las células, de conductividad celular o, incluso, realizar micromanipulaciones para modificar material biológico.

Los AFM son utilizados para estudiar las propiedades mecánicas de células [7], sin embargo, el uso de AFM comerciales implica la imposibilidad de disponer de más de una medida simultánea. Sin embargo, la

propagación del estrés mecánico en las células es muy útil para su caracterización y su cálculo requiere de varias medidas simultáneas. Por ejemplo, la aplicación de un esfuerzo en un extremo de la célula junto con la medida en otro punto de la célula puede servir para obtener información sobre la elasticidad celular. Con lo cual, una medida simultánea del esfuerzo aplicado y propagado al aplicar diferentes fármacos puede ser de gran ayuda en el estudio de dichas células.

También existen estudios que ponen de manifiesto la relación entre la diferenciación en células osteoblastos al realizar una estimulación mecánica [8], cosa que puede emplearse para controlar el crecimiento celular para realizar implantes ortopédicos.

La conductividad entre células puede ser modificada al adherirse otra célula. Esta propiedad se está utilizando en la realización de nanobiosensores para estudiar las interacciones proteína-proteína, antígeno-anticuerpo o para estudiar el crecimiento o la diferenciación celular.

En el proyecto europeo **SPOT-NOSED** [9] se está trabajando en el desarrollo de este tipo de aplicaciones, como limitación utilizan una única punta AFM conductora para realizar las medidas, la medida diferencial mediante dos puntas mejoraría los resultados en cuanto a calidad y tiempo necesario a realizar las medidas se refiere.

Esta medida diferencial sólo es posible con la utilización de dos microrobots con puntas AFM conductoras.

La micromanipulación de células vivas para inyectarles síntesis moleculares, proteínas, ácidos nucleicos u otros elementos se suele hacer con microinyecciones controladas manualmente, célula a célula, pero estas tareas

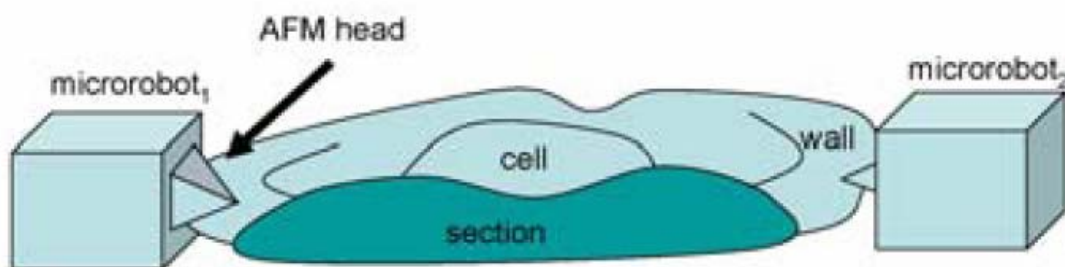


pueden realizarse de forma coordinada con dos o más microrobots [10] simplificando en gran medida todo el proceso.

Así pues, el avance tecnológico que se está realizando debe ser acompañado también por un entorno de desarrollo adecuado. Éste tendrá que incluir herramientas para el diseño e implementación de los controladores de los microrobots.

En este sentido, la creación de un modelo a escala de dichos robots permite el estudio de su comportamiento a menor coste y con una mayor agilidad. El trabajo que se presenta en este proyecto es, pues, una primera aproximación a una posible solución de este problema para facilitar el desarrollo de los algoritmos deliberativos de los microrobots cooperativos.

La aplicación que se simplificará para realizar el modelo a escala será la de microrobots dotados de puntas AFM para la realización de medidas simultáneas de esfuerzo aplicado y propagado.



### 1.3.- Objetivos

Los objetivos de este Proyecto de Fin de Carrera son los siguientes:

1.- Elaborar un Algoritmo Deliberativo que se ocupe de determinar el comportamiento funcional del robot al nivel de abstracción más alto.

Restricciones y requerimientos:

- El algoritmo debe ser el mismo para los dos robots/agentes.
- La ejecución del algoritmo en ambos robots/agentes debe llevar a la captura de una pelota, de forma que cada robot/agente quede a un lado de la pelota, y en oposición.

2.- Diseñar la circuitería de dos robots de bajo coste para ejecutar en ellos el algoritmo y obtener un resultado no simulado de la actuación del algoritmo.

Restricciones y requerimientos:

- Los robots utilizados deben ser dos minirobots de uso educativo: los BoeBot de Parallax [11].
- Cualquier tipo de comunicación explícita debe hacerse mediante infrarrojos.

## 1.4.- Organización de la Memoria

Esta memoria se desglosa en cuatro grandes bloques.

En esta **Introducción**, se ha presentado el proyecto, se ha dado una visión general del estado actual de la robótica a nivel de multiagente, se han justificado los motivos que hacen interesante el estudio en detalle de un Algoritmo Deliverativo para modelar el problema de un grupo de robots colaboradores cazadores y se han definido los objetivos a conseguir.

En el siguiente capítulo, se describirá en profundidad el proyecto y sus fundamentos teóricos. Se mostrará su ciclo de vida, la planificación seguida y las fases por las cuales ha ido rigiéndose.

A continuación, en un bloque doble, central, de este proyecto, se presentará el Algoritmo Deliverativo, así como su estructura y funcionamiento, para después pasar a describir todos los entresijos de la circuitería de los robots utilizados.

Por último, se expondrán las conclusiones, la revisión de los objetivos y una pequeña visión del futuro y posibles ampliaciones de este problema. El autor dará su opinión personal acerca del proyecto y se dará paso a las referencias bibliográficas y anexos.



## CAPÍTULO 2

---

### Descripción del Proyecto

#### 2.1.- Fundamentos Teóricos

##### **Visión:**

En el transcurso de la investigación científica, y desde la aparición de la Electrónica y posteriormente de la Informática, la Medicina se ha servido cada vez más de la Tecnología.

Para empezar a estudiar problemas complejos, se requiere simplificarlos hasta un punto esquemático que resulte lo más sencillo posible, sin perder los parecidos fundamentales de representación. El problema simplificado es llamado “Toy Problem” o “Problema juguete”.

En este caso, se aborda el problema de dos agentes que quieren atrapar una pelota como Toy Problem de dos microrrobots que atrapasen una célula.

Para ello, se define un entorno compuesto de dos agentes con la capacidad de moverse, comunicarse y, lo más importante: deliberar de forma autónoma. El entorno estará compuesto además por una pelota, que representa la célula.

### **Misión:**

Los dos Agentes Deliberativos, sin ninguna clase de control central ni de coordinación externa o ajena a ellos mismos, pero pudiendo comunicarse entre ellos, deberán actuar autónomamente para atrapar una pelota, mediante un algoritmo deliberativo que ambos tendrán en memoria.

### **Meta:**

Atrapar la pelota de manera que uno de los dos agentes quede pegado a ella y el otro se acerque de forma que la pelota quede entre ellos.

### **Aproximación:**

Se creará un Algoritmo Deliberativo, que ambos agentes se encargarán de ejecutar.

El Algoritmo será el “pensamiento” del agente para reaccionar a las distintas circunstancias del problema.

El algoritmo estará enfocado hacia la consecución de la Meta.

### **Métrica:**

Es importante definir los grados de similitud entre el Toy Problem y el problema real, pues cuanto más fielmente se represente el entorno celular, con robots caseros de aproximadamente 20x13cm, más posibilidades se abrirán para una futura aplicación médica.

Aunque el problema de atrapar una pelota puede resolverse con un número indefinido de robots de tipo variable en entornos igualmente variables, se restringe de la manera siguiente:

- El Mundo está constituido por dos robots y una pelota que están situados en un espacio delimitado (en la realidad, será la superficie de una mesa y los límites se detectan por la distancia al suelo medida por los robots). Hay que tener presente que en el problema real de examen de células no es razonable pensar que se dispondrá de más de dos microrobots por cuestiones de coste.
- Los agentes físicos utilizados serán homogéneos tanto en los servicios que ofrecen al algoritmo deliberativo (detección del borde de la mesa y comunicación rudimentaria vía infrarrojos, entre otros) como en sus características electromecánicas (velocidad y consumo de energía, entre otras). La pelota puede ser, como las células, de tamaño variable.

- Para poder simplificar el algoritmo deliberativo, se supone que la pelota no se encontrará nunca cerca de uno de los bordes de la mesa. De permitirse, el número de casos a tratar aumentaría innecesariamente, complicando el algoritmo y dificultando su implementación. Además, en el caso de la aplicación biomédica, se puede presuponer que el campo de trabajo de los microrobots será preparado de antemano y que estos casos pueden evitarse.
- Cabe pensar que en el medio celular no hay ningún tipo de iluminación. Los agentes físicos usados deben estar preparados para trabajar en condiciones pobres de luz, mejorando de paso las comunicaciones vía infrarrojos entre ellos al no tener interferencias de luz blanca.



## **2.2.- Planificación seguida**

Octubre 2006.....	Elección del Proyecto
Noviembre – Diciembre 2006.....	Documentación
1 Enero 2007 – 25 Enero 2007.....	Diseño Algoritmo Deliberativo
26 Enero 2007 – 23 Febrero 2007.....	Refinado del Algoritmo
	Aprendizaje del Robot (40 horas)
24 Febrero 2007 – 27 Mayo 2007.....	Elaboración del simulador
	Prototipazo
28 Mayo 2007 – 25 Junio 2007.....	Elaboración de la Memoria

## **2.3.- Fases del Proyecto**

A continuación se describe una breve crónica de la evolución del proyecto. En ella se comentan los problemas surgidos y cómo se han ido resolviendo.

### **Primera Fase: Búsqueda de documentación.**

Los dos primeros meses de este proyecto han consistido básicamente en navegar por Internet buscando información acerca de cualquier cosa relacionada con agentes físicos y algoritmos deliberativos. Cabe remarcar que no hay mucha documentación útil sobre el tema, y sin embargo sí que la hay muy específica. Tanto, que es arduo encontrar ayuda útil para este tipo de proyecto.

Una vez que se hubo reunido la información pertinente acerca de sistemas multiagente y swarm intelligence, se pasó a la siguiente fase, en la cual era determinante haberse sumergido en la terminología utilizada.

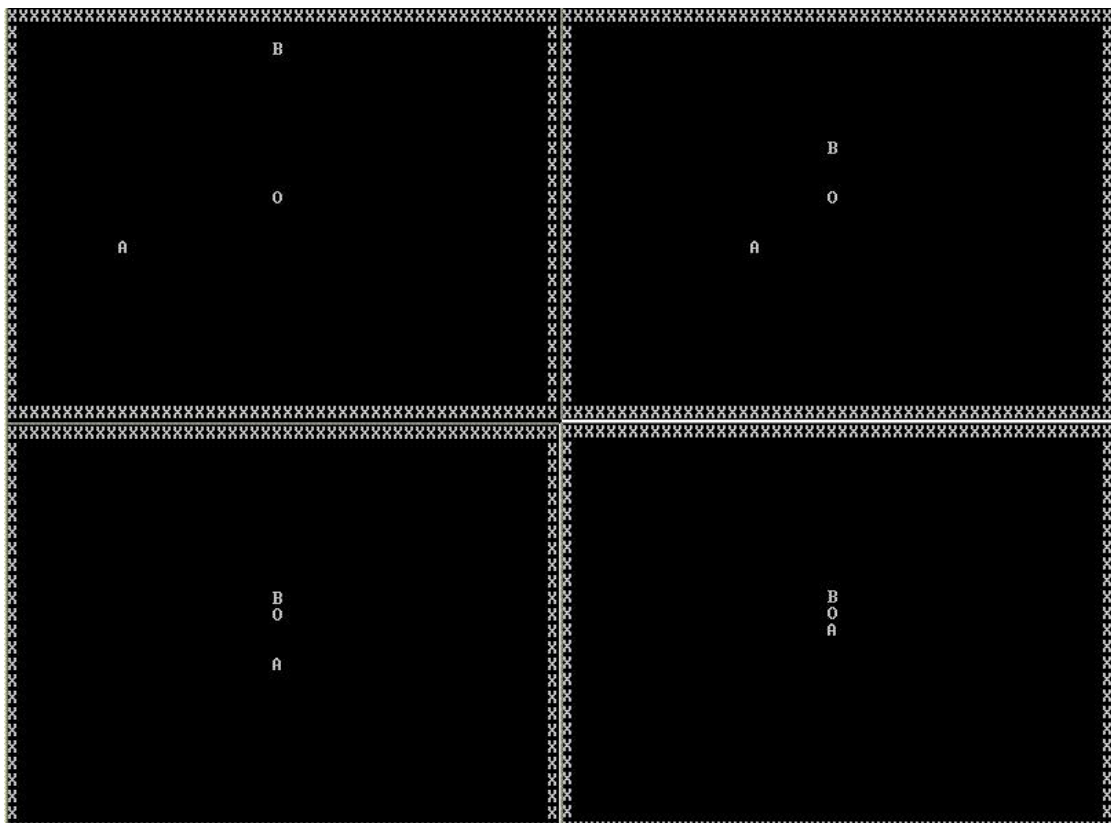
### **Segunda Fase: Definición del problema, análisis y diseño preliminar del algoritmo.**

Mediante las ideas recaudadas, llega el momento de definir claramente el problema y sus objetivos.

Posteriormente se pasa al proceso de analizar sus componentes, por ejemplo: la relación algoritmo-agente. Finalmente, se consigue una descripción en papel del algoritmo, excesivamente enrevesada, que va depurándose cada vez más en posteriores fases, conforme el problema lo va exigiendo.

### **Tercera Fase: Elaboración del State Chart. Creación de un simulador.**

Cuando el algoritmo deliberativo toma cuerpo, se hace necesario probarlo rústicamente antes de dar paso a un proceso complejo de prototipado. Para ello se elabora un programa simulador en C++ (figura 3) para ilustrar de forma gráfica el comportamiento de los agentes. Una vez conseguido, se demuestra que se ha conseguido desarrollar el Algoritmo Deliberativo. “Sólo” queda intentar demostrar su funcionamiento con un ejemplo algo más físico que un simulador: BoeBots.



- Figura 3. Secuencia de imágenes del simulador -

### **Cuarta Fase: Prototipado mediante BoeBots.**

Llegando a la recta final y sin embargo más larga fase de todo el trabajo, comienzan a multiplicarse los problemas. La inexperiencia del autor y la imprecisión de los BoeBots se unen para crear problemas inesperados que retrasan peligrosamente la consecución de resultados visibles.

#### **Problemas encontrados y su solución:**

Los problemas encontrados en esta fase están relacionados con la comunicación entre BoeBots. Debido a la poca precisión de los infrarrojos y a la fácil interferencia de la luz blanca, se hace necesaria la elaboración de una “carrocería deportiva” de color blanco para facilitar la identificación, aislar los sensores de detección del borde de la mesa y como soporte para los emisores de infrarrojos. Éstos últimos deben ser revestidos de una lente que amplifique su señal concentrando las ondas para que ambos agentes físicos puedan comunicarse. Sin embargo la comunicación se ve reducida a poco más de un metro, cuando la esperada era de 4 metros.

Para resolver el problema, se deben hacer algunos cambios en el código implementado de forma que no se altere el algoritmo, pero estirando al máximo su flexibilidad.

### **Quinta Fase: Depuración de las rutinas y subrutinas de control.**

Por último, y con todos los problemas técnicos solucionados, se pasa a depurar los pequeños detalles técnicos tales como los grados de los giros a derecha e izquierda y las subrutinas de detección del color. También se depura el código implementado para aportar mayor claridad al mismo.

### **Sexta Fase: Elaboración de la Memoria.**



## CAPÍTULO 3

---

### Diseño e Implementación

#### 3.1.- El Algoritmo Deliberativo

El algoritmo deliberativo se ocupa de determinar el comportamiento funcional del robot al nivel de abstracción más alto. Para comportamientos deterministas y de carácter reactivo [12] es conveniente organizarlo como una máquina de estados.

Dado que se trata de que varios robots “capturen” una pelota posicionándose a su alrededor, habrá una primera etapa en la que buscarán la pelota. Una vez alguno la haya detectado, los demás irán en su ayuda.

Finalmente, tendrán que posicionarse alrededor de su objetivo, la pelota, para inmovilizarla.

Como ya se ha dicho, no se trata de buscar una analogía perfecta entre la aplicación real con microrobots y la del modelo a escala. Sólo se pretende tener la suficiente similitud como para que los algoritmos deliberativos que se obtengan puedan ser fácilmente trasladables a los controladores de los microrobots.

Teniendo en cuenta el comportamiento global que se persigue y que todos los robots serán iguales, los estados que gobernarán su comportamiento individual serán los siguientes:



- Figura 4. El Algoritmo Deliberativo-



- **Búsqueda:** El robot recorre la superficie de trabajo hasta detectar la pelota.
- **Ayuda:** Búsqueda de la pelota sabiendo que ya ha sido encontrada por algún otro robot.
- **Parada:** Aproximación a la pelota y detención del robot, desde el estado de búsqueda, una vez se ha detectado.
- **Captura:** Aproximación a la pelota desde el estado de ayuda, cosa que implica la detección de otros robots a su alrededor para situarse convenientemente.

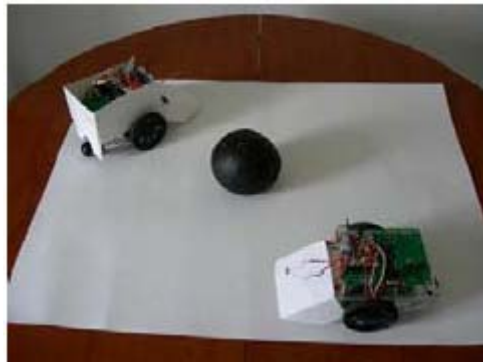
En la figura anterior se presenta el diagrama de estados correspondiente al algoritmo deliberativo que se ha obtenido.

En los siguientes subapartados se detalla qué hace cada robot en cada uno de los estados del algoritmo deliberativo.

### 3.1.1.- Estado de Búsqueda

Este es el estado en que se inicia la tarea encomendada al sistema. El robot ejecutará algún algoritmo de búsqueda para encontrar la pelota (actualmente, se trata de un recorrido zigzagueante del espacio de trabajo que se haya delimitado). Si la encuentra, enviará un mensaje de “pelota detectada” y pasará al estado de parada en el que se realiza una aproximación a la pelota antes de detenerse ante ella.

Si se encuentra en este estado (es decir, buscando la pelota) y recibe el mensaje de “pelota detectada”, significa que el otro robot ha encontrado la pelota antes, por lo que pasa al estado de ayuda. En la fig. 5 se puede ver una imagen de los dos robots en este estado y la pelota en el centro.

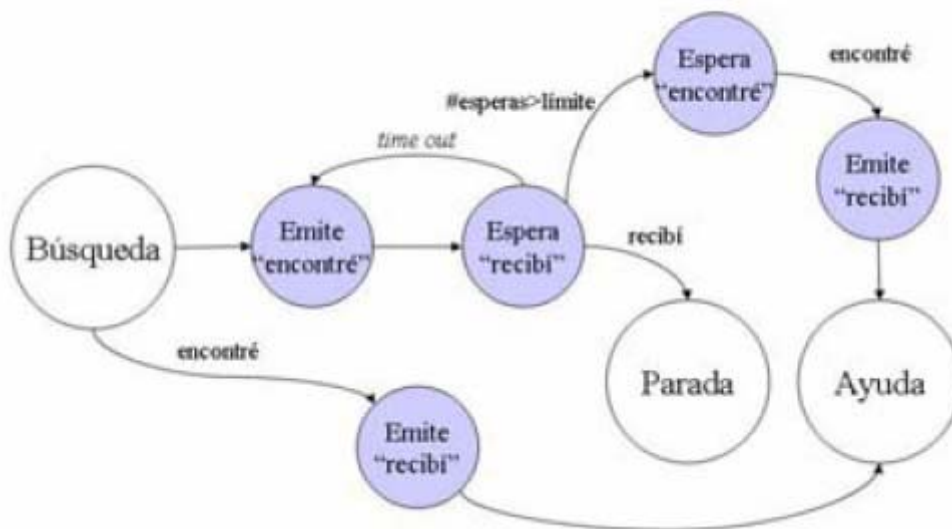


- Figura 5. Los dos robots en busca de la pelota -

Es perfectamente posible que se dé la situación en la que ambos robots encuentren la pelota a la vez y envíen el mensaje de “pelota detectada” de forma simultánea. Para prevenir el bloqueo que esto provocaría, se establece un sencillo protocolo de comunicación basado en una espera aleatoria. En la práctica, se simplifica de manera que los dos robots tengan tiempos de espera distintos, con lo que se da prioridad a uno sobre el otro.

El protocolo se ilustra en la fig. 6 sólo para la transición entre los estados de búsqueda y el de ayuda o el de parada. Tales transiciones, a más bajo nivel implica el paso por una serie de estados que representan al protocolo de comunicación establecido, en el que la recepción de un determinado símbolo emitido debe ser confirmada por el receptor. Si tal confirmación no llega en un tiempo determinado, el emisor puede optar por repetir la emisión del símbolo o bien, después de un cierto número de intentos, pasar a otro estado.

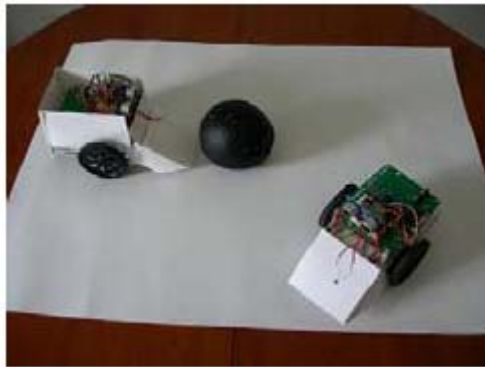
En este caso, si después de emitir el símbolo de “pelota detectada” no se recibe confirmación, se supone que el otro robot puede estar emitiendo el mismo símbolo y se pasa al estado de espera para escucharlo. Si se recibe, se emite una conformidad y se actúa en consecuencia. De no recibirlo, puede contarse con que ha habido algún problema en el sistema y se puede pasar a un estado de descanso, que no se ilustra en la fig. 6.



- Figura 6. Protocolo de comunicación entre robots -

### 3.1.2.- Estado de Ayuda

En este estado, el robot acude en ayuda del otro para “capturar” la pelota. Una vez resueltos los posibles conflictos de comunicación, uno de los dos agentes habrá pasado al estado de ayuda. En la fig. 7 el robot más alejado de la pelota se encuentra en este estado.



- Figura 7. El robot más alejado de la pelota acude en ayuda del otro -

En cuanto a manera de proceder del robot, este estado es una réplica del estado de búsqueda, con la diferencia de que, una vez encontrada la pelota, no se comunica ningún mensaje al compañero. Simplemente se pasará al estado de aproximación y captura.

Cabe señalar que, en este estado, es posible hacer una búsqueda más inteligente, pues si el robot encuentra al otro, la pelota estará en las inmediaciones.

### 3.1.3.- Estado de Aproximación y Parada

Una vez detectada la pelota, si ha sido el primero en detectarla o el protocolo de comunicación ha decidido que debe actuar como si hubiese sido el primero, el robot debe aproximarse hacia ella de forma directa y detenerse. En la fig. 8, el más cercano a la pelota, en la izquierda de la imagen, está en este estado. De esta forma se habrá posicionado para que su ayudante se sitúe al otro lado de la pelota.

Si suponemos que la velocidad de los robots es la misma, el que se encuentre en este estado siempre se habrá detenido antes de que otro esté en el estado de aproximación y captura, y comience a rodear la pelota. En la fig. 8, el robot que aparece en la parte inferior de la imagen ha detectado la pelota y pasa al estado de captura.

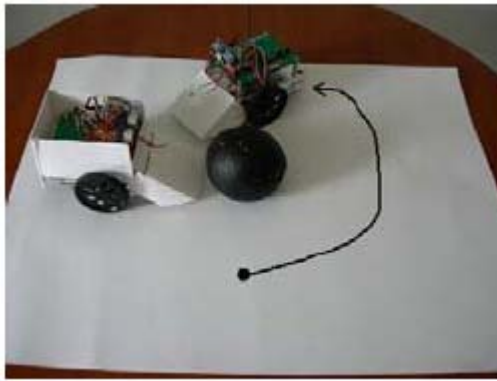


- Figura 8. El robot de la izquierda está parado ante la pelota en espera de que su compañero inicie la aproximación para conseguir capturar la pelota -

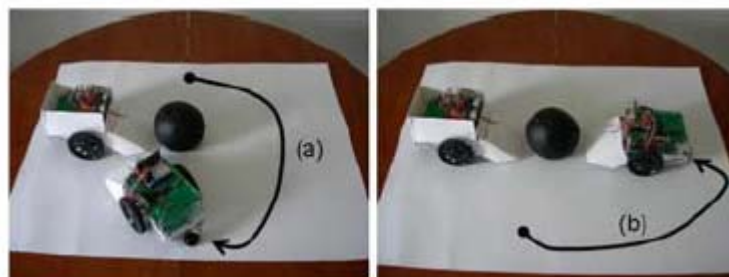
### 3.1.4.- Estado de Aproximación y Captura

Una vez detectada la pelota, si no ha sido el primero en detectarla o si el protocolo de comunicación ha decidido que debe actuar como si no lo hubiese sido, el robot debe aproximarse a la pelota y, una vez junto a ella, debe colocarse en la parte opuesta al robot que la encontró primero.

Para ello, la rodeará por un lado hasta encontrar al compañero (fig. 9) y, después, la rodeará en sentido inverso hasta encontrarlo de nuevo y, con la información obtenida, se situará en el emplazamiento correcto (fig. 10).



- Figura 9. Uno de los robots rodea la pelota en busca del otro para determinar su posición -



- Figura 10. Después de contactar con el robot parado, el “ayudante” rodea la pelota en sentido contrario (a) para situarse luego en el lugar opuesto (b) -

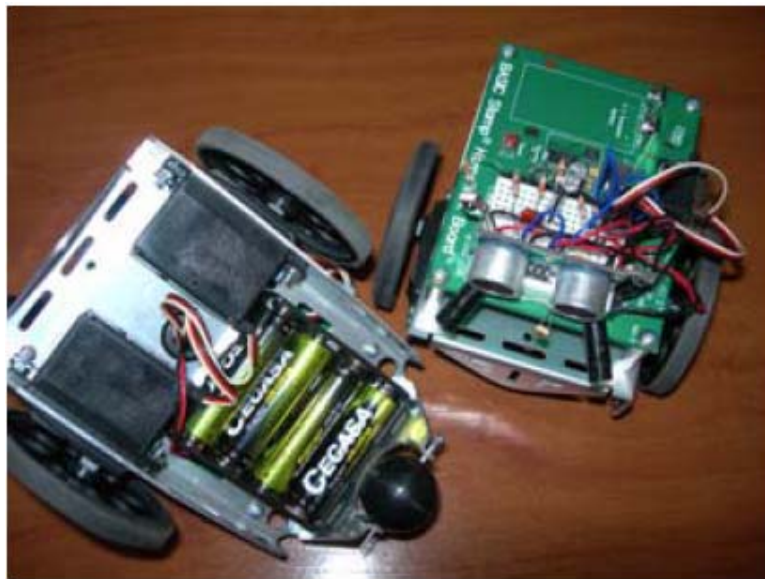
El movimiento del robot que acude en ayuda del que se ha detenido enfrente de la pelota en primer lugar podría aprovecharse, en el caso de los microrobots, para realizar las medidas de fuerza aplicada y fuerza captada a lo largo de toda la pared celular.

Según el tipo de aplicación que se quiera hacer, es probable que se requieran emisiones de otros símbolos que ayuden a realizar el “baile” alrededor de los elementos bajo examen, cosa que debería ser tratada de forma similar a cómo se ha resuelto para la asignación de roles en caso de detección simultánea de la pelota.

En todo caso, la resolución del problema juguete sólo requiere llegar hasta el punto en el que los dos robots estuviesen uno a cada lado de una pelota, es decir, que estuviese “atrapada”.

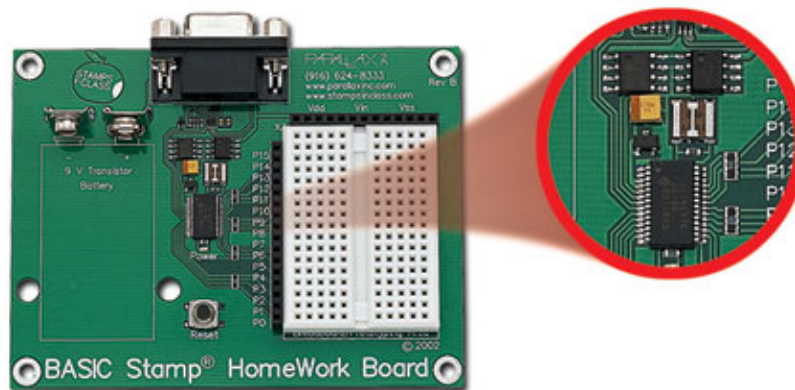
### 3.2.- Adaptación de los Minirobots empleados

Para probar los algoritmos deliberativos diseñados en el modelo simplificado a escala se han empleado dos minirobots de uso educativo, los BoeBot de Parallax (figura 11). Estos robots vienen en forma de kit con una placa de control dotada con un microcontrolador IC (figura 12) y una zona de prototipado en la que conectar diversos sensores elementales.



- Figura 11. Dos BoeBots de Parallax

Primero se describirá el uso de los componentes de navegación y comunicación y posteriormente se hará referencia al montaje de los robots.





### **3.2.1.-Especificaciones técnicas**

Para este trabajo se han utilizado los siguientes componentes:

- un sensor de ultrasonido PIING)))
- cinco emisores LED de infrarrojos
- cinco receptores IR
- un fotorresistor
- un frontal que ilumine lo que el BoeBot tiene delante

para cada uno de los robots (amén de la circuitería necesaria para la conexión de estos elementos).

Cabe decir que los BoeBots de Parallax disponen de dos servomotores que accionan las ruedas, alimentados con cuatro pilas de 1,5 voltios. La placa sin embargo va alimentada con una pila de 9V.

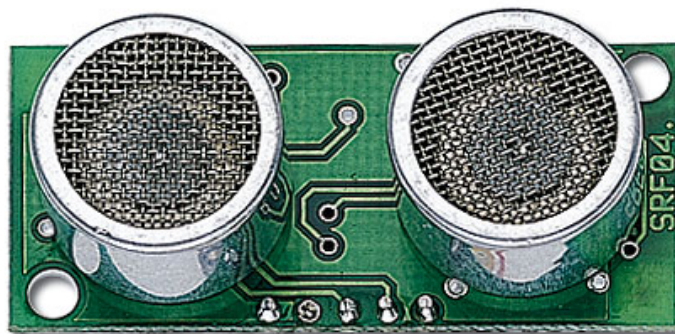
### 3.2.2.- Componentes empleados

En este subapartado se describen con más detalle los componentes que se han empleado para dar servicio al algoritmo deliberativo antes descrito.

La parte motora da servicio a las funciones de movimiento en la superficie y forma parte intrínseca del mismo robot móvil.

El resto de componentes se tratan en cada uno de los puntos de la lista siguiente:

- **Sensor de ultrasonidos:** Acoplado en la parte delantera del robot, el sensor PING))) de ultrasonidos que facilita Parallax calcula con suficiente precisión la distancia a la que se encuentra un objeto. En nuestro caso se emplea como sensor de detección de objetos a “larga distancia”. De esta manera, el robot puede, mediante ultrasonidos, detectar la pelota o a un compañero. Este sensor no permite saber qué se ha detectado, pero es un elemento de navegación básico.



- **Emisores LED IR y receptores IR:** Dos de los emisores están situados en la parte delantera del robot, apuntando hacia abajo en un ángulo de 45°.



Junto con los dos receptores IR, actúan como ayuda a la navegación, detectando precipicios. Debido a que este trabajo ha sido probado sobre una mesa grande para limitar así nuestro entorno de búsqueda, se ha hecho necesario este sistema para que el robot no se caiga de la mesa.

Otro grupo emisor de 3 LED IR, acoplado en la parte central del robot, actúa de emisor de mensajes. Mediante una rutina de detección de interferencias IR se puede “escuchar” cuántos pulsos IR se han emitido. De esta forma, se crea un sistema de comunicación rudimentario basado en los dos símbolos necesarios para que los dos robots se comuniquen.

- **Fotorresistor y linterna:** Debido a las propiedades de los fotorresistores, es posible distinguir si un objeto es blanco o negro. Si bien es cierto que el nivel de precisión es bastante bajo. Así pues, en el entorno de trabajo de los “capturadores de pelotas”, los robots han de ser de color blanco y la pelota, negra. El color del suelo o de la mesa es indiferente. Una vez que se ha detectado un objeto con el sensor de ultrasonidos, se inicia el proceso de aproximación hacia él para poder identificarlo con el fotorresistor.

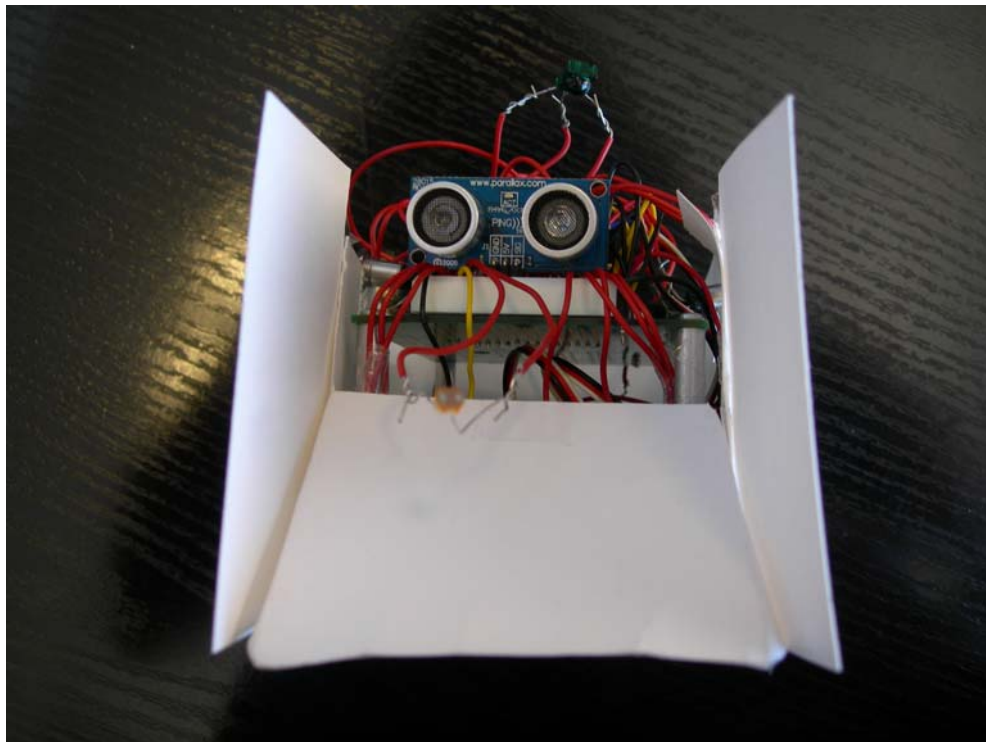
Las sombras o la poca iluminación pueden provocar un error de identificación del color de un objeto con el fotorresistor.

Para minimizar este problema se ha optado por incorporar un pequeño sistema de iluminación que consiste en una linterna. Esta linterna está acoplada al armazón del robot y debe ser encendida manualmente. La linterna apunta directamente a la zona que quedará más cerca del fotorresistor.

### 3.2.3- Montaje del Robot

A continuación se describe en detalle cómo se han montado todos estos componentes en el robot y por qué se ha hecho así.

Sobre la **parte frontal** del robot se han montado dos sensores IR y dos receptores que, como hemos dicho, serán los encargados de detectar los bordes. Para que la luz ambiente no interfiera reflejándose sobre la mesa (lo que haría detectar al robot que ha llegado al borde de la mesa), se he montado una pequeña “visera” que da sombra sobre los receptores.

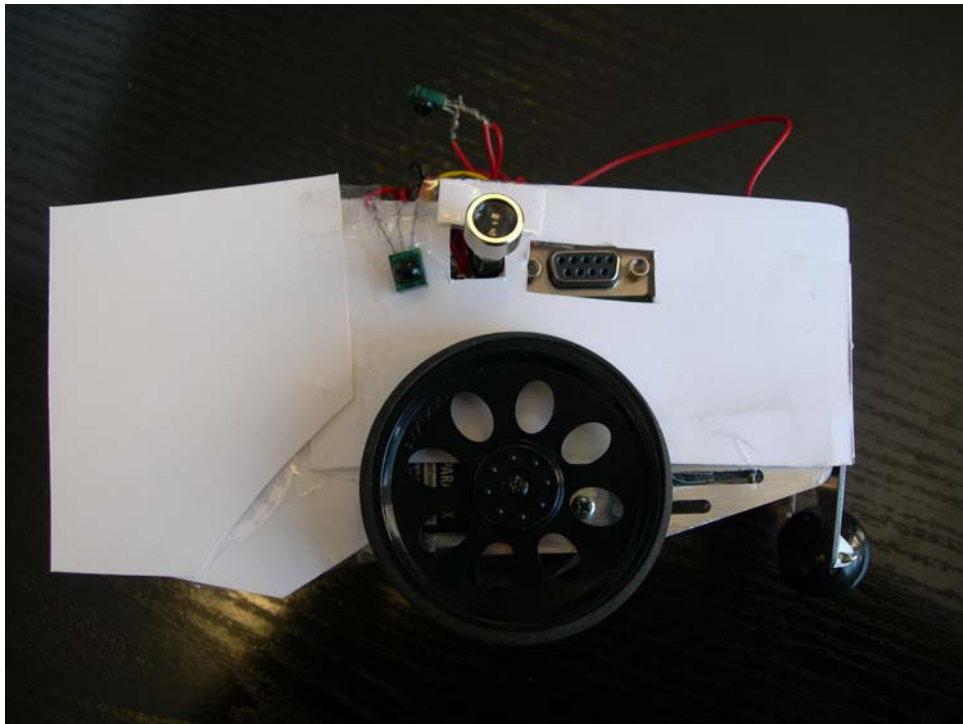


- Figura 13. Los sensores IR quedan ocultos bajo la visera-

Más arriba, el fotorresistor sobresale todo lo posible del conjunto del robot, a modo de nariz, para que “husee” el color de los objetos. Está ayudado por un frontal-linterna que ilumina el lugar a analizar.

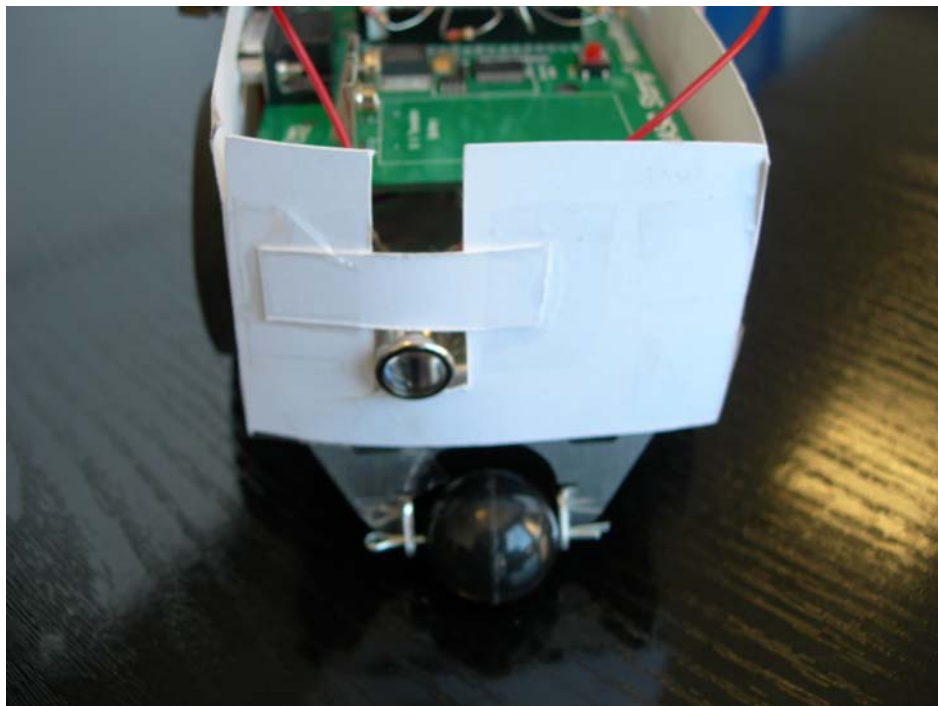
Por último, el sensor de ultrasonidos actúa como verdaderos “ojos” del robot, detectando objetos a distancia.

En los **laterales**, encontramos dos emisores y dos receptores de infrarrojos. Su objetivo es emitir y recibir pulsos de 38500Hz para hacer posible la comunicación. Este tipo de receptores está listo para responder, por ejemplo, al mando a distancia de un televisor.



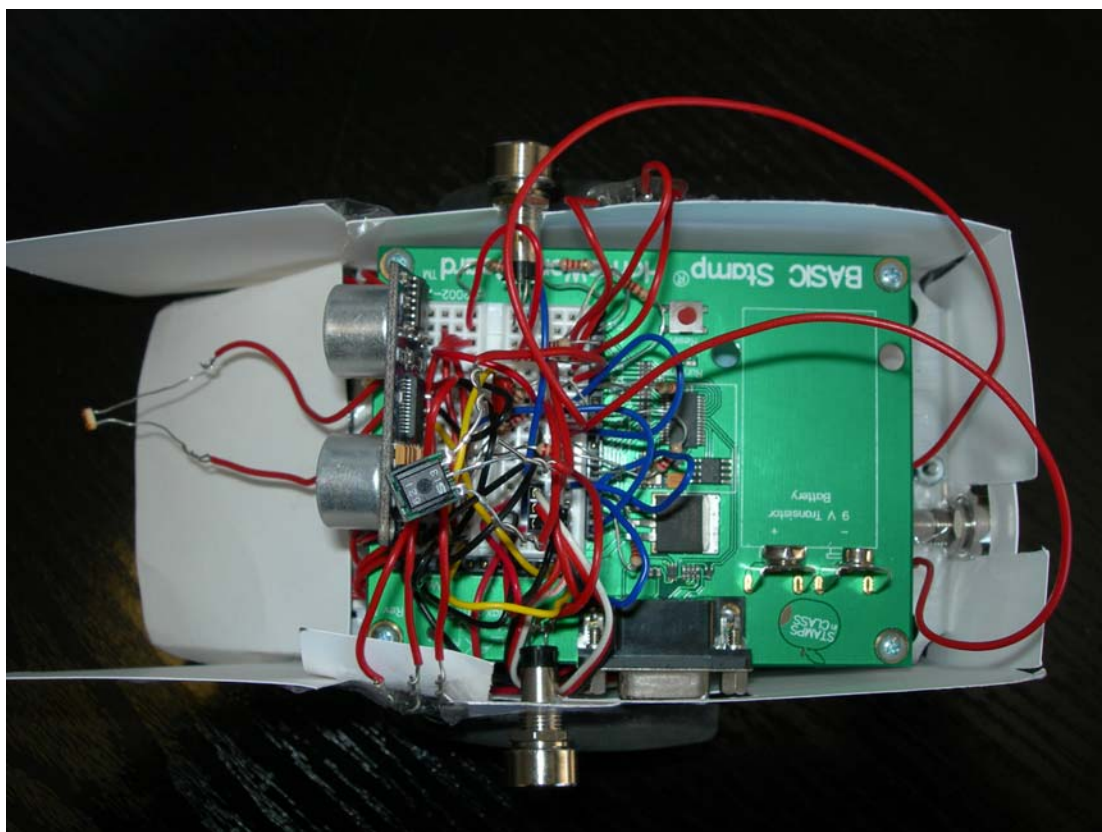
- Figura 14. Lateral-

En la **parte trasera** encontramos un tercer emisor, en la parte superior, un tercer receptor. Se han añadido para dar más confianza a la comunicación, ya que los emisores emiten una señal extremadamente concisa.



- Figura 15. Vista trasera-

El conjunto del robot ha sido literalmente “forrado” de cartulina blanca. Esto se ha realizado a efectos de facilitar la detección y la identificación de colores.



- Figura 16. Vista superior-



## CAPÍTULO 4

---

### Resultados y Conclusiones

Las aplicaciones de los microrobots en biomedicina y en otros campos son muy interesantes por las posibilidades que ofrecen. Un tipo de éstas son las que emplean AFM para la caracterización de las células bajo examen. El uso de microrobots (o micromanipuladores) que actúen coordinadamente para obtener medidas simultáneas mejora significativamente el proceso de caracterización de células.

En este trabajo se ha pretendido crear un modelo simplificado a escala que permitiera probar distintos algoritmos deliberativos para los

microrobots. Para crear un prototipo de tal modelo se ha recurrido a diseñar un sistema que resolviera un problema análogo, el de atrapar una pelota.

El modelo simplificado a escala contiene restricciones en la capacidad de cálculo, sensorial y de comunicaciones que se espera faciliten el traslado de dichos algoritmos de control a los microrobots.

En el diseño del algoritmo deliberativo se ha podido comprobar que el código correspondiente es relativamente simple y, especialmente, que las necesidades de comunicación para el trabajo cooperativo se pueden cubrir con transmisiones de unos pocos símbolos. Vale la pena insistir en que, para la resolución del problema juguete se han empleado soluciones que pueden ser de interés para las aplicaciones reales con microrobots. En particular, aquéllas que se refieren al “baile” alrededor de la pelota y las de resolución de conflictos durante la comunicación.

Para facilitar el desarrollo de este algoritmo se ha preparado un simulador simple con el que se puede observar la evolución de un sistema hasta que los robots capturan la pelota.

También se han adaptado dos minirobots, que se han dotado de sensores básicos que permiten la implementación de los servicios o funciones que emplean los algoritmos de deliberación que les controlan.

El conjunto de funciones básico incluye operaciones de movimiento y giro, así como de detección de obstáculo, color y precipicio (borde del área de trabajo). Este mismo conjunto contiene las operaciones de envío y recepción de símbolos para la comunicación. Evidentemente, tales funciones deberían ser sustituidas por otras cuya implementación sería muy distinta para el caso de los microrobots.

Así pues, se dispone de un prototipo para el desarrollo de algoritmos deliberativos que pueden emplearse luego en aplicaciones con microrobots.

**En especial, se ha podido demostrar que dos robots autónomos pueden ser capaces de coordinarse para encontrar y “atrapar” una célula, facilitando posteriores estudios de su membrana o su interior.**

En un futuro próximo se espera poder adaptar el algoritmo deliberativo descrito para controlar dos micromanipuladores (la adaptación incluirá, forzosamente, el desarrollo de las rutinas de servicio adecuadas).

Otro reto a más largo plazo es el de extender el problema para más de dos robots y con múltiples objetivos.

#### **4.1.- Objetivos conseguidos**

Después del trabajo aquí expuesto, podemos dar por satisfecho el primer objetivo y más importante: el desarrollo de un Algoritmo Deliberativo para que dos robots atrapen una pelota.

Ha quedado demostrada su eficiencia mediante la elaboración de un simulador. Ha sido sometido a varias pruebas para comprobar su robustez y se han corregido sus imprecisiones.

En cuanto al segundo objetivo, también muy importante por el hecho de haber recaído en él gran parte de los esfuerzos de este proyecto, puede decirse que ha sido alcanzado mediante el tesón y el esfuerzo, ya que todas las subrutinas programadas para los robots funcionan para casos normales y el algoritmo puede ser reconocido en el movimiento de los BoeBots.

En efecto, los robots colaboran y acaban atrapando la pelota, si bien aún se podría trabajar mucho afinando sus rústicos movimientos.

## **4.2.- Posibles ampliaciones del Problema**

El problema que nos atañe puede admitir una interesante ampliación al caso genérico.

Por un lado, podemos aumentar el número de robots con los que queremos atrapar una pelota (una pelota muy grande en relación con el tamaño de los robots). Se puede establecer un algoritmo basado en el actual aunque un poco más general a la hora de calcular el posicionamiento de los robots que ayudan.

Por otra parte, podría ser interesante el caso más general de todos, en el que se quiere que muchos robots atrapen muchas pelotas, tratando de maximizar el número de pelotas atrapadas y minimizar el número de robots necesarios para atrapar cada pelota, que además pueden ser de tamaños distintos dentro del mismo mundo.

Las posibilidades que se abren son bastantes y muy suculentas. Relacionadas o no con el mundo de la medicina.

#### **4.3.- Agradecimientos y valoración personal**

Personalmente, trabajar en este proyecto ha sido una satisfacción con la cual cierro un ciclo universitario. Esta carrera, que a veces se me ha hecho muy cuesta arriba, me ha demostrado que sin embargo puede darme satisfacciones como las de trabajar con un par de simpáticas máquinas que -relativamente- hacen lo que se les dice.

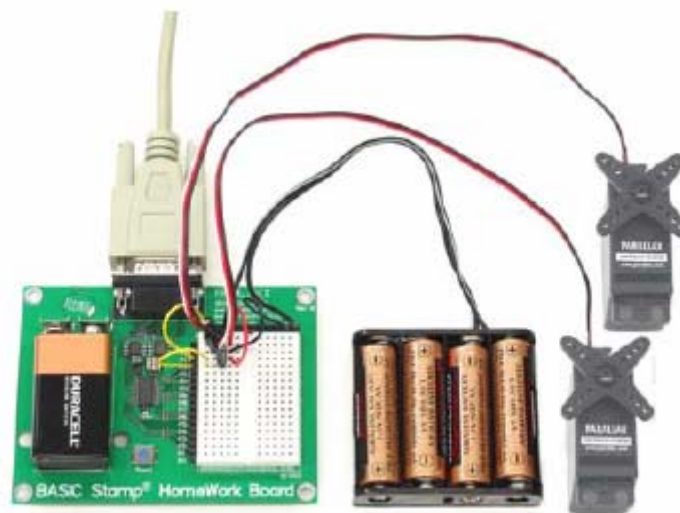
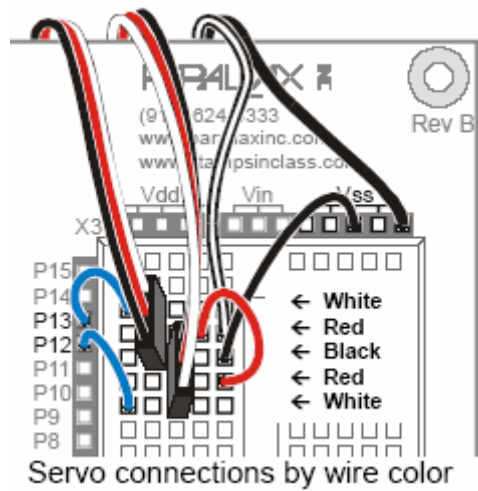
He tenido la ocasión de hacer este proyecto en una universidad ajena a la mía propia, y conocer otra gente y otra cultura, lo cual engrosa aún más mi aprendizaje.

Me gustaría agradecer a la Universidad Autònoma de Barcelona esta estancia, al departamento el ambiente sano y agradable y a Lluís Ribas la buena guía que me ha dado en este proyecto.

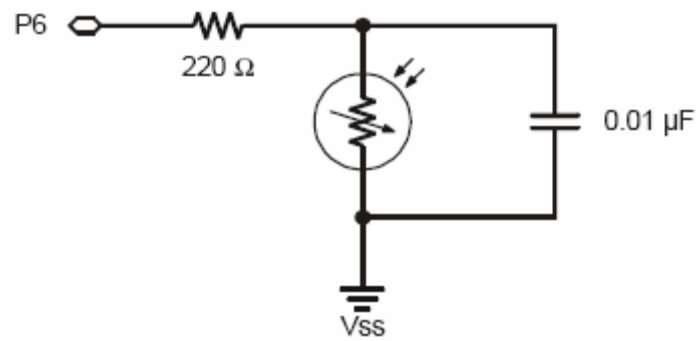
**Jorge García Colmenar**

## ANEXO A: ESQUEMAS DE CIRCUITOS UTILIZADOS

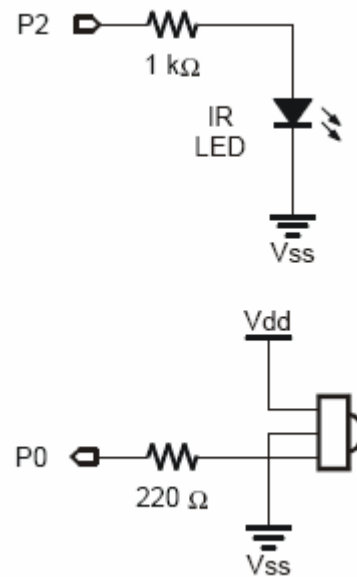
- Colocación de los servomotores:



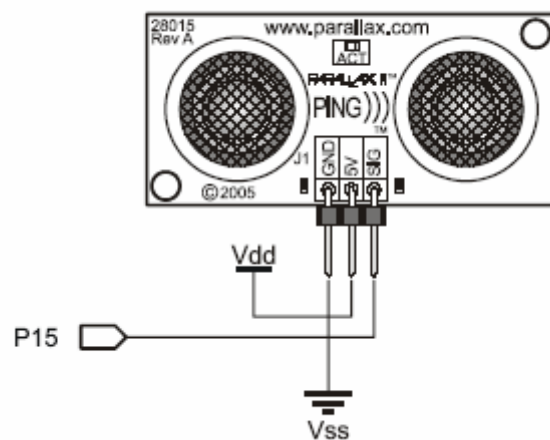
- Circuito del fotorresistor:



- Emisor y receptor de infrarrojos



- Sensor de ultrasonidos





## **ANEXO B: GLOSARIO Y DEFINICIONES**

### **Infrarrojo**

La radiación infrarroja o radiación térmica es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. Consecuentemente, tiene menor frecuencia que la luz visible y mayor que las microondas.

### **Minirrobot y Microrrobot**

En esta memoria se utiliza el término *minirrobot* para referirse a un robot de bajo coste y pequeño, con poca funcionalidad. *Microrrobot* se usa para referirnos a robots de alta tecnología utilizados en diversos propósitos científicos.

### **Sistema multiagente**

Es una colección de agentes coexisten en un mundo o ambiente, interactúan (implícita o explícitamente) y tratan de optimizar la resolución de un problema.

### **Ultrasonido**

Onda acústica cuya frecuencia está por encima del límite perceptible por el oído humano (aproximadamente 20 KHz). Muchos animales como los delfines y los murciélagos lo utilizan de forma parecida al radar en su orientación.

## ANEXO C: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS Y BIBLIOGRAFÍA

### Referencias bibliográficas

- [1] [www.robocup.org](http://www.robocup.org)
- [2] Beni & Wang -1989
- [3] S. Martel, *et al.*, “Three-legged wireless miniature robots for mass-scale operations at the sub-atomic scale.” In *Proc. IEEE Int’l. Conf. Robotics & Automation (ICRA)*, 2001.
- [4] J. Brufau, *et al.*, “MICRON: small autonomous robot for cell manipulation applications.” In *Proc. of the IEEE Int’l. Conf. on Robotics & Automation (ICRA)*, 2005.
- [5] M. L. Chen, *et al.*, “Agent-Based Microassembly.” In *Int’l. Workshop on Microfactory*, Fribourg, Switzerland, pp. 39-42, October 9-10, 2000.
- [6] Ogawa, H. “Indispensable Technologies For Microassembly.” In *Int’l. Workshop on Microfactory*, Fribourg, Switzerland, pp. 103-106, October 9-10, 2000.
- [7] J.Alcaraz, L. Buscemi, “Microrheology of Human Lung Epithelial Cells measured by Atomic Force Microscopy.” *Biophysical Journal*, Vol. 84, 2071-2079, March 2003.
- [8] M. Palma, *et al.*, “Physiological strains induce differentiation in human osteoblasts cultured on orthopaedic biomaterial.” *Biomaterials*, 24(18) 2003, 3139-3151.
- [9] “SPOT-NOSED: Single Protein Nanobiosensor Grid Array.” EU Project IST-2001-38899. [Online: [www.nanobiolab.pcb.ub.es/projectes/spotnosed/](http://www.nanobiolab.pcb.ub.es/projectes/spotnosed/)]

[10] F. Tagliareni, B. Stadelbauer, T. A. Syed and T. Velten, “A microfluidic SyringeChip for Microinjection with integrated Actuator.” In *Proc. of the 2003 World Microtechnologies*.

[11] [www.parallax.com](http://www.parallax.com)

[12] C. Jones, D. Shell, M.J. Mataric', B. Gerkey, “Principled Approaches to the Design of Multi-Robot Systems,” in *Proceedings of the Workshop on Networked Robotics*, IEEE/RSJ Int'l. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS), Sendai, Japan, September 2004.

## **Bibliografía General**

- Robotics with the BoeBot, de Parallax, inc.
- What's a Microcontroller, de Parallax, inc.
- [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- Cagniant, H. (191985). Contribution à la connaissance des fourmis marocaines. Étude des Camponotus du groupe cruentatus au Maroc (Hyménoptères - Formicidae). Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse, 121: 77-84





El número de aplicaciones de los microrobots en biomedicina crece a medida que el desarrollo de éstos avanza. Entre ellas se encuentran las consistentes en examinar células con microrobots cooperantes. En este trabajo se presenta un prototipo a escala de este problema, debidamente simplificado: dos robots tratan de atrapar una pelota que representa a la célula que se examina. Como resultado, se ha obtenido un Algoritmo Deliberativo para la resolución de este problema con robots homogéneos.

El nombre d'aplicacions dels microrobots en biomedicina creix a mesura que el seu desenvolupament avança. Entre elles hi ha les consistentes a examinar cèl·lules amb microrobots cooperants. En aquest treball es presenta un prototip a escala d'aquest problema, convenientment simplificat: dos robots tracten d'agafar una pilota que representa la cèl·lula que s'examina. Com a resultat, s'ha obtingut un algorisme deliberatiu per a la resolució d'aquest problema amb robots homogenis.

The number of applications of micro-robots in biomedicine is growing as their development advances. Among these applications there are the ones consistent to examining cells with cooperative micro-robots. In this work it is presented a scale prototype of this problem, which is conveniently simplified: two robots try to take a ball that represents the cell that is examined. As a result, a deliberative algorithm for the resolution has been obtained from this problem with homogeneous robots.